УДК 621.039.51

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТВЭЛОВ НА ОСНОВЕ ОБОГАЩЕННОГО УРАНА НА ЛОКАЛЬНЫЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Ю.А. Артельный, П.М. Гаврилов, И.В. Шаманин*, В.Н. Нестеров*

ФГУП Сибирский химический комбинат, г. Северск
*Томский политехнический университет
E-mail: shamanin@k21.phtd.tpu.ru

Анализируются изменения локальных нейтронно-физических параметров активной зоны уран-графитовых реакторов, вызванные загрузкой твэлами различных конструкций на основе обогащенного урана. Сформулирована рекомендация, позволяющая снизить эффект обезвоживания при сохранении запаса реактивности.

Введение

Актуальность работы обусловлена предполагаемыми изменениями в технологии изготовления твэлов на основе обогащенного урана для уран-графитовых реакторов. Твэлы на основе обогащенного урана дисперсионного типа [1] представляют собой цилиндрический сердечник – матрицу на алюминиевой основе, в которую диспергирован диоксид урана, в герметичной оболочке из алюминиевого сплава.

Принципиальным отличием твэлов новой конструкции от твэлов старого типа является уменьшение высоты сердечника при неизменной высоте самого тепловыделяющего элемента. В продольном разрезе оба типа тепловыделяющих элементов представлены на рис. 1.

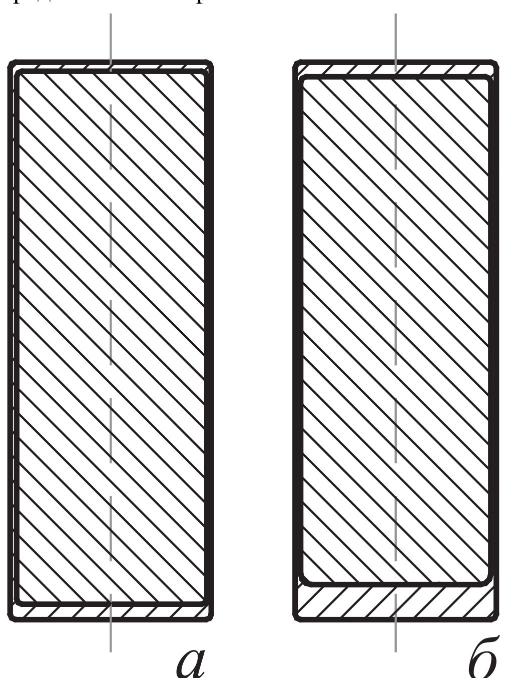


Рис. 1. *Упрощенный вид твэлов в продольном разрезе: а) старого; б) нового типа*

Твэлы загружаются в технологические каналы (рис. 2). На внутренней поверхности каналов расположены пять продольных рёбер, предназначенных для исключения касания твэлов со стенкой. Каждое из рёбер в поперечном сечении представляет собой равнобедренный треугольник. В зазор, образованный внешней поверхностью твэла и внутренней поверхностью канала, подается водный теплоноситель с целью отвода тепловой энергии, выделяющейся в процессе деления. В качестве замедлителя используются блоки из реакторного графита. Совокупность блоков представляет собой кладку, в аксиальном направлении пронизанную технологическими каналами.

Даже незначительные изменения в конструкции твэлов могут вызвать: локальные изменения выгорания урана; изменения аксиального и радиального распределений плотностей потоков нейтронов как по твэлу, так и по активной зоне реактора; изменение эффекта обезвоживания. Все они определяющим образом влияют на эксплуатационную безопасность реакторов.

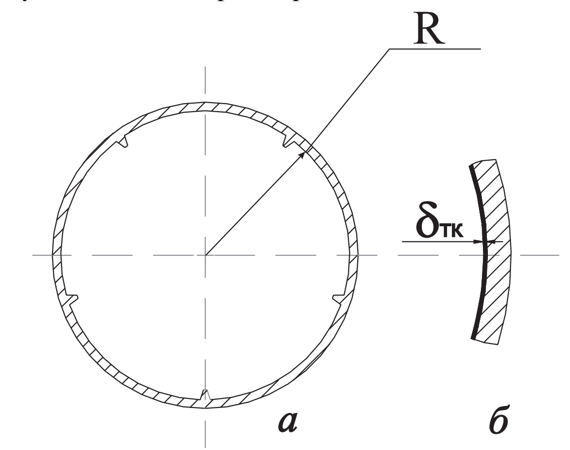


Рис. 2. *Модель технологического канала: а) поперечный разрез; б) стенка*

Модель ячейки уран-графитового реактора

Для определения нейтронно-физических характеристик каналов, загруженных твэлами старого и нового типов, была проведена серия расчётов с использованием программного комплекса SCALE [2]. Модель ячейки (рис. 3) включала в себя следующие элементы: графитовый блок, труба технологического канала, теплоноситель (вода), твэл. Для наглядности изображен только один твэл, а не полная загрузка канала. Геометрия расчета – трехмерная.

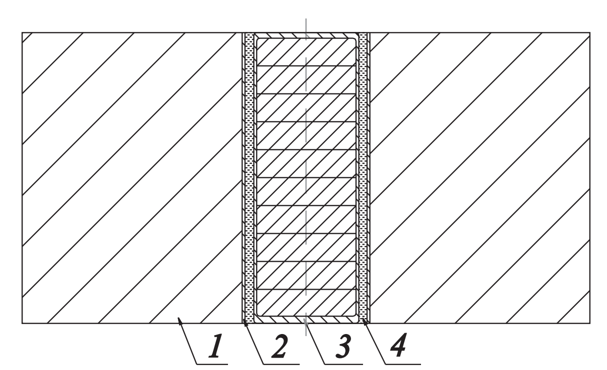


Рис. 3. *Модель ячейки, включающая: 1) графитовый блок; 2) технологический канал; 3) твэл; 4) теплоноситель*

В аксиальном направлении твэл можно представить как конструкцию, состоящую из трех элементов: верхний торец оболочки, сердечник, нижний торец оболочки. Ядра U^{235} и U^{238} равномерно распределены по всему объёму сердечника твэла. Масса делящихся изотопов и радиус сердечника одинаковы для твэлов старого и нового типов. Предполагается, что все твэлы имеют нулевой эксцентриситет.

При создании модели был введен ряд приближений:

- отсутствие рёбер, что компенсировалось эффективной добавкой стенки канала – δ_{TK} (рис. 2). Значение δ_{TK} есть положительный корень квадратного уравнения $\delta^2-2R\delta+S/\pi=0$, где S – сумма площадей поперечных сечений всех ребер, R – внутренний радиус трубы технологического канала. Необходимо отметить, что переход к такой модели не приводит к заметной погрешности в расчётах элементарной ячейки данного типа с использованием твэлов на основе обогащенного урана. Дополнительный (фиктивный) слой металла вместо тонкого слоя воды незначительно ужесточает спектр нейтронов, но при высоком обогащении практически не изменяет значения произведения коэффициента использования тепловых нейтронов на вероятность избежать их резонансного захвата. Коэффициент использования несколько возрастает, вероятность избежать захвата – уменьшается, а их произведение остается постоянным в пределах статистической погрешности расчета по программе SCALE 0,2 % [2].
- в качестве конструкционного материала, из которого изготовлены каналы, оболочка и сердечники твэлов, применяется алюминий без примесей.

Данная модель позволяет провести расчет нейтронно-физических параметров для загрузок твэлами старого и нового типов. Расчеты проводились для загрузок на плато и периферии реактора. Загрузки различаются только количеством твэлов и их месторасположением в активной зоне реактора.

Результаты расчетов и их интерпретация

С применением программного комплекса SCALE были получены коэффициенты размножения для ячеек, загруженных (в соответствии с программами загрузок уран-графитовых реакторов) твэлами нового и старого типов, находящихся в холодном разотравленном состоянии на начало кампании.

Коэффициенты размножения для ячеек, загруженных твэлами нового типа, меньше на ~0,04 % (для загрузки на плато реактора) и на ~0,05 % (для загрузки на периферии реактора), по сравнению с коэффициентами размножения для ячеек, загруженных твэлами старого типа. При этом погрешность расчета не превышает 0,03 %.

Данный эффект обусловлен:

- снижением средней плотности потока тепловых нейтронов по сердечнику твэла нового типа по сравнению со старым типом (рис. 4), что приводит к уменьшению количества реакций деления на ядрах U^{235};
- увеличением в твэлах нового типа (относительно твэлов старого типа) внутреннего радиального блок-эффекта на ~0,18 % и внутреннего торцевого блок-эффекта на ~1,2 %. Это связано с увеличением концентрации делящихся изотопов из-за уменьшения высоты сердечника твэла нового типа, что приводит к увеличению доли нейтронов, участвующих в реакции (n,γ) на ядрах U^{238}.

Несмотря на снижение коэффициентов размножения для ячеек, загруженных твэлами нового типа, отмечается лишь незначительное изменение эффекта обезвоживания: на ~0,19 % (для загрузки на плато реактора) и на ~0,12 % (для загрузки на периферии реактора) относительно загрузок ячеек твэлами старого типа.

Обезвоживание технологических каналов приводит к:

- увеличению потоков нейтронов всех энергий в среднем по ячейке. В большей степени обезвоживание каналов оказывает влияние на увеличение потока нейтронов тепловых и эпитепловых энергий. Это обусловлено известными причинами: нейтроны высоких энергий генерируются в твэлах, а процесс замедления нейтронов (в большей степени) до тепловой и близких к ней энергий происходит в графите (замедлителе). Увеличение потока тепловых нейтронов в сердечнике твэлов обоих типов на ~20 % уменьшает величину внутреннего торцевого блок-эффекта и снижает экранировку ядер делящихся изотопов. Значительное увеличение плотности потока нейтронов в сердечнике не даёт пропорционального увеличения всплеска потока тепловых нейтронов (за счёт их утечки) в приторцевых областях сердечника и торцевой части оболочки, что приводит к увеличению коэффициента использования тепловых нейтронов θ.

Для твэлов нового типа увеличение θ будет значительнее, чем для старого типа;

- ужесточению спектра нейтронов, что вызовет увеличение количества делений на ядрах U^{238} в твэлах обоих типов. Результаты расчетов на базе программного комплекса SCALE [2] показали, что средняя плотность потока быстрых нейтронов в твэлах нового типа выше, чем в твэлах старого типа (рис. 4).

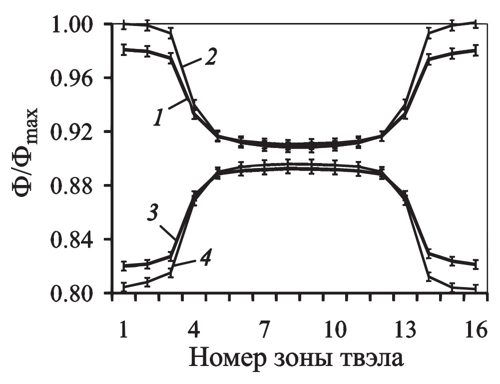


Рис. 4. *Распределение плотности потока тепловых (1, 2) и быстрых нейтронов (3, 4) по высоте твэла старой и новой конструкции соответственно (зоны 1–3, 14–16 – верхний и нижний торцы оболочки, зоны 4–13 – сердечник) обозначения Ф*

В твэлах нового типа (с учётом ужесточения спектра нейтронов) по сравнению со старым типом следует ожидать ряд локальных эффектов, а именно:

- увеличится число нейтронов деления;
- уменьшится число мгновенных нейтронов, но при этом средняя энергия мгновенных нейтронов будет выше, что приведет к увеличению вероятности деления ядер U^{238} мгновенными нейтронами и снижению доли нейтронов, участвующих в реакции радиационного захвата (n,γ) на ядрах U^{238} [3];
- увеличится доля запаздывающих нейтронов.

Средняя энергия запаздывающих нейтронов деления составляет ~0,5 МэВ [3], что приведет к увеличению количества делений ядер U^{235} в твэлах нового типа (для ядер U^{238} минимальная энергия деления составляет ~1 МэВ) и уменьшению величины внутреннего торцевого блок-эффекта. Уменьшение величины торцевого блок-эффекта связано с тем, что максимум потока быстрых нейтронов приходится на центральную область твэла (рис. 4), сечение поглощения нейтронов ядрами кислорода для промежутка энергий 5,53...821 кэВ практически равно нулю, а сечение поглощения нейтронов ядрами алюминия является минимальным [4]. Следовательно, увеличение концентрации ядер U^{235} в твэлах нового типа и уменьшение длины свободного пробега по сравнению со старым типом приводит к увеличению вероятности деления ядер U^{235} запаздывающими нейтронами (преимущественно в центральной части сердечника), а не поглощения их ядрами алюминия. Для случая запаздывающих нейтронов величину «паразитного» поглощения их ядрами алюминия в твэлах можно описать путем введения коэффициента вредного поглощения, который равен отношению массы алюминия к массе U^{235} в сердечнике. Увеличение коэффициента приводит к снижению коэффициента использования запаздывающих нейтронов (в данном случае мы говорим о делении U^{235} только запаздывающими нейтронами) и увеличению величины внутреннего торцевого блок-эффекта. Для твэлов нового типа коэффициент вредного поглощения меньше, чем для твэлов старого типа.

Заключение

Проведенный анализ совокупности локальных нейтронно-физических параметров активной зоны уран-графитовых реакторов указывает на то, что применение твэлов с укороченным сердечником позволяет повысить ядерную безопасность и сохранить запас реактивности путем частичного изменения загрузок активной зоны. Одним из таких возможных решений, обеспечивающим не только сохранение запаса реактивности, но и снижение эффекта обезвоживания, является уменьшение количества твэлов, загружаемых в технологические каналы, и их перераспределение по высоте активной зоны (смещение твэлов в технологических каналах к центру активной зоны).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Займовский А.С., Калашников В.В., Головнин И.С. Тепловыделяющие элементы атомных реакторов. – М.: Атомиздат, 1966. – 520 с.
2. Гаврилов П.М., Цыганов А.А., Кохомский А.Г. и др. Возможность использования пакета прикладных программ SCALE для нейтронно-физических расчетов уран-графитовых реакторов // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 3. – С. 63–68.
3. Горбачев В.М., Замятин Ю.С., Лбов А.А. Взаимодействие излучений с ядрами тяжелых элементов и деление ядер. Справочник. – М.: Атомиздат, 1976. – 464 с.
4. Бартоломей Г.Г., Бать Г.А., Байбаков В.Д., Алтухов М.С. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 512 с.